

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

基于ET的水资源与 水环境综合规划

王 浩 周祖昊 秦大庸 桑学锋 等 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

基于ET的水资源与 水环境综合规划

王 浩 周祖昊 秦大庸 桑学锋 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

基于 ET 的水资源与水环境综合规划方法是面向资源型缺水地区水资源与水环境管理重大实践需求的一种新型规划方法。本书系统阐述了该方法的理论内涵、调控机制、规划原则、规划目标、规划思路、规划模型构建以及实践应用。研究成果极大地丰富了区域水资源与水环境综合规划的理论方法体系,反映了本学科领域的先进水平,可为资源型缺水地区水资源与水环境规划和管理提供有力支撑,对同类缺水地区具有普遍的推广与借鉴意义。

本书可供水资源、环境、生态、农业等相关专业科研、规划和管理人员使用,也可供大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于 ET 的水资源与水环境综合规划 / 王浩等著. —北京: 科学出版社, 2013. 6

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-037990-0

I. 基… II. 王… III. ①水资源-水利规划-研究 ②水环境-环境规划-研究 IV. ①TV212 ②X32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 136134 号

责任编辑: 李 敏 张 震 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 6 月第一次印刷 印张: 12 插页: 2

字数: 500 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在 2010 年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域 973 计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河 973 计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011 年 10 月 10 日

序

传统水资源管理中的节水更多地体现为取水量的节约，而从区域资源量的角度分析，其节水作用未必如想象中的大。而以“ET 管理”为核心的水资源管理，将通常意义上定义的植被蒸腾、土壤及水体的蒸发，扩展到包括社会水循环中人类生产、生活过程产生的蒸发，即节水指的是蒸散发量（ET）的减少，这才是对流域/区域水资源量的“真实”节约。基于 ET 的水资源管理的实质是对传统水资源管理的需求侧进行更深层次的调控和管理，也是对水循环中水资源消耗过程的一种管理，而在此基础上进行污染物入河调控和管理则更具有科学性和合理性。因此，针对水资源短缺日益严重的现状，立足于水循环二元演化内在机理，进行以水资源消耗为核心的水资源与水环境管理不仅必要而且非常迫切。

课题组提出的以水资源消耗为核心的水资源与水环境管理理论内涵、调控机制、规划原则、规划目标、规划思路，是对传统水资源与水环境规划方法新的发展；建立的高强度人类活动地区水资源与水环境综合模拟体系，实现了人工水循环与自然水循环耦合模拟、地表水和地下水耦合模拟、水量和水质耦合模拟，为水资源与水环境综合规划和管理提供了可靠的量化工具；提出的包括 ET 总量、地表水取水总量、地下水取水总量、国民经济用水总量、生态环境用水总量、污染排放总量以及入海（出境）水量在内的七大总量控制指标体系，则为流域/区域水资源与水环境综合管理提供了有力的抓手。

该研究成果在海河流域多个地区得到了应用，充分体现了成果的科学性、合理性、前瞻性和可操作性。成果不仅对水资源与水环境学科领域的理论方法和技术创新具有重要的价值，也对资源型缺水地区的水资源与水环境管理实践具有普遍而重要的指导意义。

中国工程院院士

2013 年 3 月

前 言

海河流域是我国政治中心、文化中心和经济发达地区，具有地理区位优势、自然资源丰富、陆海空交通发达、工业基础和科技实力雄厚、拥有骨干城市群五大优势，是我国经济较为发达同时蕴藏着巨大发展潜力的地区。近年来，环渤海经济区综合实力显著增强，随着对外开放进一步扩大，第二产业、第三产业发展加快，该区域已成为中国北方经济发展的“引擎”，被经济界誉为继珠江三角洲、长江三角洲之后的我国经济第三个“增长极”。

与重要的战略地位不匹配的是，海河流域是我国水资源最为紧缺的地区，水资源、水环境问题十分突出。在全国七大流域中，海河流域的人均、亩均水资源量均最低。与此同时，海河流域污水排放量不断增加，河湖水体和地下水污染严重，对渤海湾海域的环境造成严重威胁。近年来，尽管流域内节水和治污力度加大，但在强人类活动与气候变化的双重影响下，海河流域水资源供需矛盾日益凸显，水质劣化、湿地萎缩、地下水位下降等生态环境问题进一步加剧。为妥善处理流域开发治理面临的新问题，迫切需要从新的视角去研究和破解。

为了综合解决海河流域的水资源与水环境问题，使海河流域的水资源与水环境综合管理水平获得真正提高和重大进步，在水利部公益性行业专项经费项目“气候变化对我国水安全的影响及对策研究”（200801001）、国家 973 计划项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（2006CB403400）、水利部和财政部专项“我国节水型社会建设理论技术体系及其实践应用研究”（水综节水〔2006〕50 号）、国家自然科学基金创新研究群体项目“流域水循环模拟与调控”（51021006）、世界银行 GEF 项目“天津市水资源与水环境综合管理规划制定”（TJSHZ505）、国家自然科学基金项目“基于广义 ET 的水资源调配机理与模型研究”（51009149）、中国水利水电科学研究院科研专项“水资源开发利用控制红线确定及指标体系建立”（ZJ1224）的支持下，中国水利水电科学研究院基于 ET 管理和水资源与水环境综合管理的理念，以天津市为研究区，以六个专题研究和三个县级规划为支撑，编制了天津市的水资源与水环境综合管理规划，提出了天津市水资源与水环境综合管理指标和管理措施。

本研究从理论内涵、调控机制、规划原则、规划目标、规划思路等方面系统地、原创性地提出了基于 ET 的水资源与水环境综合规划方法；基于 ET 控制理念和二元水循环理

论, 将 AWB 模型 (水资源与污染负荷配置)、SWAT 模型和 MODFLOW 模型耦合起来, 创新性地建立了高强度人类活动地区水资源与水环境综合模拟体系, 实现人工水循环与自然水循环耦合模拟、地表水和地下水耦合模拟、水量和水质耦合模拟; 首次面向资源型缺水地区水资源与水环境综合管理的重大实践需求, 开创性地提出了以耗水量控制为核心的区域水资源整体调控的七大总量控制指标体系。本研究成果创新性强, 规划成果科学、合理、可操作性强, 既可为天津市水资源与水环境综合管理提供有力支撑, 对于资源型缺水地区又具有普遍的推广与借鉴意义。2010 年 11 月本项目通过水利部国际合作与科技司组织的科技成果鉴定, 认为项目成果“达到国际领先水平”; 2010 年 12 月项目成果荣获中国水利水电科学研究科技应用一等奖; 2011 年 5 月规划获得天津市发展和改革委员会批复实施; 2011 年 10 月成果荣获大禹水利科学技术奖三等奖。

本书是上述成果的深化、凝练和总结, 共分为 8 章: 第 1 章总结了水资源规划发展的历程、存在问题及发展趋势, 由魏怀斌、王浩、周祖昊、苟思、朱厚华撰写; 第 2 章介绍了基于 ET 的水资源与水环境综合规划理论方法与模型, 由王浩、周祖昊、桑学锋、秦大庸撰写; 第 3 章介绍了研究区的基本概况、规划目标及任务, 由杨贵羽、张俊娥、葛怀凤撰写; 第 4 章构建了研究区水循环与水环境耦合模型平台, 由桑学锋、周祖昊、魏怀斌、葛怀凤撰写; 第 5 章分析了规划方案, 由桑学锋、杨贵羽、王明娜、张瑞美、葛怀凤、褚俊英撰写; 第 6 章对规划方案进行了评价和优选, 由桑学锋、秦大庸、张瑞美、魏怀斌撰写; 第 7 章提出了基于 ET 的水资源与水环境综合管理目标和措施, 由褚俊英、杨贵羽、朱厚华、魏怀斌撰写; 第 8 章总结了项目主要成果与结论, 由周祖昊、张瑞美撰写。全书由王浩、周祖昊、桑学锋、秦大庸统稿并校核。

在本书成书的过程中, 胡鹏、张楠、尹吉国、李扬、俞煊、陈强、孙少晨、曹铮、贺华翔、崔小红、蔡静雅等做了部分辅助工作, 贾仰文、裴源生、王建华、刘家宏、李海红、牛存稳、杨志勇、邵薇薇、刘扬等提供了十分有益的建议, 道格拉斯·奥森 (Douglas Olson)、蒋礼平、韩振中、刘斌、周年生、严晔端、李万庆、秦保平、沈大军、刘盛彬等专家提供了大量技术指导, 天津市水利局闫学军、何云雅、魏素清、邢荣和环境保护局张淑英、侯晓珉、孙韧、卢学强等领导为本研究做了大量的协调和支持工作, 天津市水利勘测设计院、天津市水利科学研究院、天津市水文水资源勘测管理中心、天津市环境保护科学研究院、天津市环境保护开发中心、天津市环境监测中心等单位给本研究提供了有力的技术支持, 在此一并表示感谢! 同时感谢所有参考文献的作者!

受时间和水平的局限, 书中难免有挂一漏万和错误悖谬之处, 敬请广大读者批评指正。

2013 年 3 月

目 录

总序
序
前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水资源规划研究进展	1
1.1.1 水资源规划的国外研究进展	1
1.1.2 水资源规划的国内研究进展	3
1.2 水资源规划发展历程	5
1.2.1 概述	5
1.2.2 发展历程	6
1.3 存在的问题及发展趋势	10
1.3.1 存在的问题	10
1.3.2 发展趋势	11
第 2 章 基于 ET 的水资源与水环境综合规划理论方法与模型	12
2.1 基于 ET 的水资源与水环境综合规划理论	12
2.1.1 理论内涵	12
2.1.2 调控机制	14
2.1.3 规划原则	15
2.1.4 规划目标	16
2.2 基于 ET 的水资源与水环境综合规划决策方法	17
2.2.1 水资源决策特点	17
2.2.2 决策方法和思路	18
2.2.3 目标 ET 计算方法	20
2.2.4 方案设置方法	21
2.2.5 情景模拟方法	22
2.2.6 方案评价方法	25
2.3 基于 ET 的水资源与水环境综合规划模型	27

2.3.1	目标函数	27
2.3.2	水量水质计算方程	27
2.3.3	约束条件	29
2.3.4	模型功能特点	31
第3章	天津市基本情况、规划目标及任务	33
3.1	天津市概况	33
3.2	基线调查	35
3.2.1	经济社会基线调查	35
3.2.2	水资源量基线调查	37
3.2.3	供用水及耗水情况基线调查	41
3.2.4	生态环境基线调查	46
3.2.5	水资源与水环境管理现状	53
3.2.6	水资源与水环境存在问题	55
3.3	规划目标、任务及依据	57
3.3.1	规划目标	57
3.3.2	规划任务	57
3.3.3	规划依据	58
3.3.4	规划水平年	61
3.4	技术路线	61
第4章	天津市水循环与水环境耦合模型平台	63
4.1	平台结构	63
4.2	模拟原理	63
4.2.1	子模型耦合关系	63
4.2.2	“地表-地下”水循环耦合模拟	64
4.2.3	“自然-社会”二元水循环耦合模拟	64
4.2.4	水量水质耦合模拟	65
4.3	平台构建	66
4.3.1	AWB 模型构建	66
4.3.2	SWAT 模型构建	67
4.3.3	MODFLOW 模型构建	76
4.4	模型校验	81
4.4.1	地表水水量、水质模拟与校验	81
4.4.2	地下水模拟与校验	84

4.4.3 ET 模拟与校验	87
第5章 规划方案分析与设置	89
5.1 水资源利用方案	89
5.1.1 地表水	89
5.1.2 地下水	90
5.1.3 再生水	91
5.1.4 海水	95
5.1.5 微咸水	95
5.1.6 雨水	96
5.2 国民经济节水方案	97
5.2.1 经济社会发展预测	97
5.2.2 国民经济节水方案分析	103
5.3 水生态修复方案	106
5.3.1 天津市水生态总体规划目标	106
5.3.2 河道内生态用水方案	107
5.3.3 河道外生态用水方案	110
5.3.4 入海水量控制方案	117
5.4 水污染控制方案	118
5.4.1 天津市水功能区划及其环境规划目标	118
5.4.2 污染物预测	119
5.4.3 水污染控制方案	122
5.5 方案设置	128
5.5.1 主要因子	128
5.5.2 方案设置说明	130
第6章 规划方案评价与优选	133
6.1 指标评价	133
6.1.1 资源指标评价	133
6.1.2 生态指标评价	136
6.1.3 环境指标评价	139
6.1.4 社会指标评价	140
6.1.5 经济指标评价	142
6.2 方案优选	143
6.2.1 2010 水平年方案优选	145

6.2.2	2020 水平年方案优选	145
6.3	水资源与水环境综合分析	146
6.3.1	供水分析	146
6.3.2	用水分析	148
6.3.3	ET 控制分析	149
6.3.4	水生态分析	150
6.3.5	水环境分析	151
6.4	各水平年之间的比较	152
6.4.1	水资源分析	152
6.4.2	ET 分析	152
6.4.3	生态环境分析	152
6.4.4	经济社会分析	153
第 7 章	管理目标和措施	154
7.1	管理目标	154
7.1.1	总体目标	154
7.1.2	具体指标	154
7.2	管理措施	159
7.2.1	推进地表水总量控制，实现区域地表水优化配置	160
7.2.2	强化地下水总量控制，实现地下水采补平衡	161
7.2.3	实施 ET 管理与国民经济用水总量控制，促进“真实节水”	162
7.2.4	保障生态用水总量，实现水生态良好发展	164
7.2.5	加强入海总量控制，促进近海生态健康发展	165
7.2.6	建立排污总量控制和环境倒逼机制，满足水功能区要求	165
7.2.7	保障措施	168
第 8 章	成果、结论与展望	171
8.1	主要成果	171
8.1.1	研究成果	171
8.1.2	创新点	172
8.2	结论	172
8.3	展望	174
参考文献		176

第 1 章 | 绪 论

随着人们对水资源规划认识的不断深入和科学的进步，水资源规划从最开始仅针对水资源系统的较为单一的规划逐步发展为考虑“经济社会-资源-生态-环境”复杂系统的综合规划，其规划理论和规划方法也在不断拓展和深入中。本章综述了国内外水资源规划的研究进展，归纳了水资源规划的对象、目标、理念不断拓展的发展脉络，总结了“就水论水”的水资源规划、基于宏观经济的水资源规划、面向生态的水资源规划、广义水资源规划、基于 ET（耗水）的水资源规划以及水资源与水环境综合规划 6 种模式的发展历程，讨论了目前存在的主要问题与发展趋势。

1.1 水资源规划研究进展

1.1.1 水资源规划的国外研究进展

水资源规划主要是对流域或区域水利综合规划中关于水资源多种功能的协调、为适应各类用水需要的水量科学分配、水的供需分析及解决途径、水体污染的防治规划等方面的总体安排。水资源规划的历史伴随人类文明的发展。据历史记载，公元前 3500 年的古埃及已有全世界历史最悠久的水资源规划。

(1) 早期的水资源规划

早期的水资源规划主要是理论和方法的雏形，主要有：

1) 水位资料记录。最初出现在古埃及，工程师在尼罗河利用水位测量标尺来观察河流的水位情况并记下详细的流量资料。如果尼罗河水位比较危险，工程师会立刻通知人们尽快迁移到安全的地方。

2) 流量测定。从水位资料记录到流量测定经过了漫长时期。1 世纪初一个埃及人最先提出“同在一个横断面上的水流速度是相同的”假定。可不幸的是直到 16 世纪，埃及水文学的奠基人 Benedeto Castelli（1577 ~ 1644 年）才重新发现这个定理，奠定了水资源规划的基础。

3) 相关方程。18 世纪数学领域学者发现了许多数学公式，其中对水文水资源有重要意义的公式有：皮托（Pitot）公式，可用来计算流体力学的数据；伯努利（Bernoulli）能量方程，准确地描述了能量守恒的基本原理；欧拉（Euler）在伯努利方程中添加了一个能量组成的重要概念，使得该方程更加完美，成为欧拉运动方程的重要组成部分。

(2) 近代水资源规划与实践

随着人们知识领域的进步与突破，17 世纪和 18 世纪发展出了专门研究水资源科学和

技术的团体，主要包括英格兰皇家社会学院、法国皇家科学院和法国公路与桥梁公司。水资源规划日新月异，逐渐走向成熟，出现了有影响力的水资源规划实践。

1) 河流规划。18 世纪中叶，乔治·华盛顿（George Washington）首次把水资源规划付诸实践，在华盛顿市修建了五个水闸来控制船舶的进出。这是历史上比较完善的水资源规划工程。

2) 流域规划。1808 年，美国财政部长艾伯特·加勒廷（Albert Gallatin）在报告中第一次提出了进行综合水资源规划，将运河河道作为运输工具。约翰·韦斯利·鲍威尔（John Wesley Powell）先生则提出了将土地和水资源进行联合规划的建议，并且利用他的影响力使得地图上开始提供地质和水文信息的综合数据。密西西比河下游的规划将土地利用和防洪规划统一了起来，避免了洪水将位于河边漫滩的城市淹没。经过一系列悲惨的洪水事件后人们逐渐认识到：只有将来水暂时储存，再现时调配才能控制洪水的泛滥。1913 年亚瑟·摩根（Arthur Morgan）博士建议在俄亥俄州南部迈阿密盆地的代顿（Dayton）经济开发区修建长达 63km 的横穿 9 个重要城市和 5 个干枯水库的长堤和渠道。当地政府采纳了该建议，并在 1922 年由当地财团资助修建完成。

（3）现代水资源规划

1953 年，美国陆军工程师兵团（USACE）在美国密苏里河（Missouri River）流域研究 6 座水库的运行调度问题时设计了最早的水资源模拟模型。1955 年，哈佛大学开始制定一个水资源大纲，并于 1962 年出版了《水资源系统分析》一书，将系统分析引入水资源规划，开始了流域水资源配置模型研究。Bellman R. (1962) 提出了动态规划，用来求解多阶段决策过程的最优策略。1972 年，Young 和 Bredenoef 提出了一个由水文模型和经济模型等组成的地表水和地下水联合管理运行的模拟模型。1977 年，Haimes Y. Y. 运用大系统分解-协调技术研究了地表水和地下水的联合管理运行问题。美国麻省理工学院（MIT）于 1979 年完成了阿根廷河里奥·科罗拉多（Rio Colorado）流域的水资源开发规划，用模拟模型技术对流域水量的利用进行了研究，提出了多目标规划理论、水资源规划的数学模型方法并加以应用。1985 年，美国康奈尔大学（Cornell University）的 Loucks D. P. 教授等提出了水资源系统工程的“交互模型方法”，认为决策模型不仅要反映系统的物理本质，而且必须与人类思维方式和用户的认识模式相一致，与实际决策过程要吻合；在决策过程中，模型还必须充分反映决策者的要求、愿望和主观判断。20 世纪 90 年代以来，由于水污染、水危机加剧，传统的以水量和经济效益最大为目标的水资源配置已不适应形势的发展，一些国家开始在水资源优化配置中考虑水质约束、环境效益和水资源可持续利用研究。1992 年，Afzal 等针对巴基斯坦的某处灌溉系统建立线性规划模型，对不同水质水的使用问题进行优化。1997 年 Wong 等提出支持地表水、地下水联合运用的多目标、多阶段优化管理的原理与方法，在需求预测中要求地下水、当地地表水、外调水等多种水源联合运用，并考虑地下水恶化的防治措施。1999 年 Kumar 等建立了污水排放模糊优化模型，提出了在流域水质管理经济和技术上可行的方案。1995 年 Watkins 介绍了一种伴随风险和不确定性的可持续水资源规划框架，建立了有代表性的联合调度模型。

1.1.2 水资源规划的国内研究进展

我国是一个历史悠久的文明古国,也是对水资源规划、开发利用最早的国家之一。公元前256年,秦朝蜀郡太守李冰修建的都江堰工程就是利用水资源灌溉农田的伟大工程。

公元前246年,水工郑国修建的郑国渠西起泾阳,引泾水向东,下游入洛水,全长150多千米,灌溉面积达110万亩^①,大大改善了关中地区的农业生产条件。

水资源规划与利用主要集中于农田水利、防洪治河和航运,但几千年的封建制度极大地阻滞了我国水资源规划事业的发展。步入近代,当世界上许多国家大规模发展水资源基础研究的时候,我国却沦为半殖民地半封建社会,外受帝国主义列强的侵略,内有封建统治和军阀混战,水资源规划研究停滞不前。直到20世纪40年代中期,国民政府与美国垦务局签约准备利用美国资金建设水电站,并邀请了该局总工程师、世界知名水利专家萨凡奇来华考察。萨凡奇在三度实地考察三峡地区后,写出了《扬子江三峡计划初步报告》。

新中国成立以后,水资源规划研究发展迅速。20世纪60年代就开始了以水库优化调度为先导的水资源分配研究,最早是以发电为主的水库优化调度。到了20世纪80年代,区域水资源的优化配置问题在我国开始引起重视。20世纪80年代初,以华士乾教授为首的研究小组曾对北京地区的水资源系统利用系统工程方法进行了研究,该项研究考虑了水量的区域分配、水资源利用效率、水利工程建设次序以及水资源开发利用对国民经济发展的作用,可以说是水资源系统中水量合理分配的雏形。随后他们将其水资源模型在北京及海河北部地区进行了应用。20世纪80年代中后期,华士乾教授提出了水资源合理配置研究课题。在理论研究方面,贺北方于1988年提出区域水资源优化分配问题,并建立了大系统序列优化模型,采用大系统分解协调技术进行求解,且于次年建立了二级递阶分解协调模型,运用目标规划进行产业结构调整,并将该优化模型应用到了郑州市水资源系统分析与最优决策研究中。1989年吴泽宁等以经济区经济效益最大为目标,建立了经济区水资源优化分配的大系统多目标模型及其二阶分解协调模型,采用多目标线性规划技术求解,并以三门峡市为实例进行了验证。

1994~1995年,由联合国开发计划署(United Nations Development Programme, UNDP)和联合国环境署(United Nations Environment Programme, UNEP)组织援助、新疆维吾尔自治区水利厅和中国水利水电科学研究院负责实施的“新疆北部地区水资源可持续开发利用总体规划”项目,对新疆北部地区的经济、水资源和生态环境之间的协调发展进行了较为充分的研究,提出了基于宏观经济发展和生态环境保护的水资源规划方案,研究成果受到国际组织和国内专家的高度评价,并且取得了地方政府的认可。

中国水利水电科学研究院、航天工业总公司710研究所和清华大学相互协作,在国家“八五”攻关和其他重大国际合作项目中系统地总结了以往工作的经验,将宏观经济、系统方法和区域水资源规划实践相结合,提出了基于宏观经济的水资源优化配置理论,并在

^① 1亩 $\approx 666.7\text{m}^2$ 。

这一理论指导下建立了区域水资源优化配置决策支持系统，并应用该系统对华北水资源问题进行了专题研究。他们在该专题中开发的“宏观经济水资源规划决策支持系统 MEWAP-DSS”是迄今为止较为完整的水资源合理配置应用体系。同时，在水资源合理配置的基础理论和分析技术与方法等方面均有很大突破。

黄河水利委员会利用世界银行贷款进行了“黄河流域水资源经济模型研究”，并在此基础上结合国家“八五”科技攻关项目，进行了“黄河流域水资源合理分配及优化调度研究”（薛松贵和常炳炎，1998），对地区经济可持续发展与黄河水资源、地区经济发展趋势与水资源需求、黄河水资源规划决策支持系统、干流水库联合调度、黄河水资源合理配置、黄河水资源开发利用中的主要环境问题等进行了深入研究，并取得了较多成果。这项研究是我国首个对全流域进行水资源合理配置的研究项目，对全面实施流域管理和水资源合理配置起到了典范作用。

谢新民等（2000）根据宁夏回族自治区的实际情况和急需研究解决的问题，基于可持续发展的理论，利用水资源系统分析的理论和方法，分析和确立了宁夏回族自治区水资源优化配置的目标及要求，建立了水资源优化配置模型。

王忠静等（2002）应用复杂适应系统理论的基本原理和方法，构架出了水资源配置系统分析模型。

陈晓宏等（2002）以大系统分解协调理论作为技术支持，运用逐步宽容约束法和递阶分析法，建立了东江流域水资源优化调配的实用模型和方法，并对该流域特枯年水资源量进行了优化配置和供需平衡分析。王浩等（2002a）系统地阐述了水资源总体规划体系应建立以流域系统为对象、以流域水循环为科学基础、以合理配置为中心的系统观，以多层次、多目标、群决策方法作为流域水资源规划的方法论。

王浩等（2003c）在“黄淮海水资源合理配置研究”中，提出水资源“三次平衡”的配置思想，系统地阐述了基于流域水资源可持续利用的系统配置方法。

尹明万等（2003）结合河南省水资源综合规划试点项目，根据国家新的治水方针和“三先三后”原则，在国内外首次建立了基于河道内与河道外生态环境需水量的水资源配置动态模拟模型。该模型反映了水资源系统的多水平年、多层次、多地区、多用户、多水源、多工程的特性，能够将多种水资源进行实时调控，实现动态配置和优化调度模拟有机结合的模型系统。

2002 年水利部印发的《全国水资源综合规划技术大纲与细则》，吸收了国内外近年来水资源评价与规划的最新理论和技术方法，吸取了我国水资源评价与规划的多项成果和工作经验，反映了我国水资源评价与规划的最高水平，也表明了我国传统水资源配置的方法已基本成熟。随着对水资源认识的逐步深入，广义水资源理论和实践得到发展，广义水资源的配置研究应运而生。

裴源生等（2006）探讨了广义水资源合理配置的理论内涵、配置系统、配置目标及协调与冲突、研究框架、调控机制、全口径供需平衡分析方法和后效性评价体系，并将其应用于宁夏回族自治区，制定了该地区的广义水资源配置方案。

孙敏章等（2005）尝试将遥感 ET 引入水资源管理配置中，并进行了有效探索。胡明

罡等(2006)将遥感 ET 技术应用到北京农业用水的可持续规划中,且取得了不错的效果。

蒋云钟等(2008)探讨了基于 ET 指标的水资源合理配置方法,并将其应用于南水北调中线工程实施后的北京市水资源合理配置战略研究。

王浩、秦大庸、周祖昊、桑学锋等(2009)在完成的“天津市水资源与水环境综合管理规划”中,系统地提出了基于 ET 的水资源与水环境综合规划方法体系,创新和发展了水资源与水环境规划方法。

何宏谋等(2011)结合 ET 管理的水资源管理新理念,在深入分析和探讨了黄河流域现行地表水资源管理体系所需补充完善之处的基础上,从区域水量平衡基本方程出发,构建了一个融合 ET 管理理念的包括地表水资源管理体系、ET 管理体系、地下水水资源管理体系在内的黄河流域水资源综合管理技术体系,并对建立和完善 ET 管理体系所需解决的问题及其可能的途径进行了探讨。

1.2 水资源规划发展历程

1.2.1 概述

从水资源规划的发展历程来看,随着人们认识水平的提高和科学技术的发展,水资源规划经历了不断拓展、不断深化的过程,具体可归纳为三个方面:

1) 规划的对象不断拓展。从最初的地表水量分配为主发展到地表水和地下水联合调度配置;从对当地常规水资源(地表水和地下水)进行分配发展到对常规水源和非常规水源(再生水、海水、微咸水、雨水蓄积)及外调水的统一调配;从对狭义水资源(蓝水)的分配发展到狭义水资源(蓝水)和广义水资源(绿水)统一分配;从对供水量的配置发展到对取水量与耗水量的统一分配;从对水资源量的分配发展到水量水质联合配置。

2) 规划的目标不断拓展。从单一的供水效益发展到在区域水资源规划中分别考虑经济(人均 GDP)、环境(人均 BOD 排放量)、农业生产(人均粮食产量 FOOD)、城镇就业率(INC);从不同程度的割裂经济因素、社会因素和环境因素的规划到统一考虑水资源开发与区域经济、社会、环境多目标的协调发展;从单一的经济效益最大化到经济效益与生态效益之和最大,再拓展到资源、生态、环境、社会、经济等多维调控目标下的水资源合理配置。主要指标含义如下:①资源目标主要反映在满足一定约束条件下通过区域水资源的高效利用使水循环系统达到最好的补给排泄状态;②环境目标主要为通过控制区域污染物的排放,使得区域水环境质量达到最好;③生态目标体现在陆域生态系统和海域生态系统状态最好,如水生态达到水生态功能区划要求,近海岸生态得到改善;④社会目标是实现现代社会整体高速发展,在水资源水环境综合规划中要体现稳定、和谐的理念,主要体现为保证人饮安全、实现区域间供水公平;⑤经济目标主要为实现区域粮食不减产、农民不减收、经济效益最大化。

3) 规划的理念不断发展。在生产力发展水平低下的时代,各部门竞争用水的矛盾并